

认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性

魏瑞轩¹, 倪天^{2†}, 赵晓林³, 张兴宇²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 中国人民解放军95835部队, 新疆 马兰 841700;

3. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 借鉴人在复杂动态环境中的自主防碰撞行为, 可以构建具有认知防碰撞能力的无人机. 针对认知防碰撞决策的有效性, 将认知无人机与环境的动态交互过程作为整体, 通过分析认知无人机-环境系统状态的运动模式, 基于混合时间集建立了认知无人机-环境系统的脉冲微分包含(IDI)模型. 按照认知无人机防碰撞过程的IDI运行机理, 将系统状态空间划分为三类运行域, 建立了认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性定义, 进而运用IDI理论, 导出了使认知无人机-环境系统防碰撞稳定的充要条件. 仿真实验结果表明, 导出的防碰撞稳定条件可以为无人机认知防碰撞决策的有效性提供依据.

关键词: 无人机; 防碰撞稳定; 脉冲微分包含; 认知决策

引用格式: 魏瑞轩, 倪天, 赵晓林, 等. 认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1453-1460

DOI: 10.7641/CTA.2019.80330

Collision avoidance stability of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system

WEI Rui-xuan¹, NI Tian^{2†}, ZHAO Xiao-lin³, ZHANG Xing-yu²

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;

2. Unit 95835 of PLA, Malan Xinjiang 841700, China;

3. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710051, China)

Abstract: Benefited from autonomous collision avoidance behavior of human in some dynamic complex environment, it is possible to construct an unmanned aerial vehicle (UAV) with cognitive collision avoidance ability. For the validity problem of cognitive decision-making in collision avoidance, the dynamic interaction process between UAV and environment is considered integrally. By analyzing state running patterns of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system, the impulse differential inclusions (IDI) model of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system is established based on hybrid time trajectory. And the system state space is partitioned into three classes of running fields according to IDI running mechanism within cognitive UAV's collision avoidance process, thus, the definition of collision avoidance stability for the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system is established. Furthermore, the necessary and sufficient condition that guarantees the collision avoidance stability of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system is deduced by utilizing IDI theory. Finally, simulation experiment results verify that the proposed condition of collision avoidance stability can provide a basis for the validity of UAV's cognitive decision-making in collision avoidance.

Key words: unmanned aerial vehicle; collision avoidance stability; impulse differential inclusions; cognitive decision-making

Citation: WEI Ruixuan, NI Tian, ZHAO Xiaolin, et al. Collision avoidance stability of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1453 - 1460

1 引言

无人机的自主防碰撞技术是保证无人机在自由空域安全飞行的关键技术, 是当前无人机领域的研究热

点. 传统的碰撞规避方法主要分为预先规划(全局)和基于即时感知信息的反应式(局部)避碰两大类^[1]. 由于飞行环境的动态性使得预先规划方法在实际应用

收稿日期: 2018-05-07; 录用日期: 2019-04-28.

†通信作者. E-mail: tianni0423@foxmail.com; Tel.: +86 13179873689.

本文责任编辑: 段志生.

国家自然科学基金项目(61573373, 61503405)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573373, 61503405).

中需要不断地进行重规划,应用局限性大.反应式避碰方法通过感知局部环境的变化实时地做出反应动作,具有更好的适应性,主要研究方法有碰撞锥^[2]、障碍速度^[3-4]、几何优化^[5]、人工势场法^[6-7]和基于制导律的方法^[8-9]等,但此类方法目前主要针对的是单一碰撞模式的规避问题,对于自由空域中复杂多变的防碰撞情形难以有效.

对于环境动态复杂的飞行空域,碰撞威胁目标多且难以预知,已经无法用单纯的威胁模式来处理复杂动态的防碰撞问题.而人类在复杂动态环境中却有着很好的适应能力,这得益于人脑强大的认知决策功能^[10-11].研究表明,借鉴飞行员的认知智能,有助于建立一个更加高效的飞行决策框架^[12].Stenger等^[13]研究了基于Soar认知架构的无人机与动态环境的自主交互决策方法.文献[14]用认知博弈模型描述无人机与入侵机的防撞运动过程,设计了一种基于认知安全域的防碰撞控制策略.He等^[15]将认知发育的思想应用于无人机防撞,提出了基于感知-逻辑-发育的规避机制,有效提高了多威胁环境中碰撞规避的实时性.Panov等^[16-17]研究基于认知功能特性的无人机行为规划方法,建立了包含认知功能的无人机自主行为规划系统,为提高无人机适应复杂环境的在线路径规划能力提供了新的方法思路.

但是,对于无人机认知防撞的一些理论问题,尚无清晰的解答.如认知决策功能是以怎样的形式影响无人机的防撞运动的?在什么情况下可以确保无人

机的认知防撞决策是安全有效的?本文拟通过对认知无人机-环境系统状态运动形式的分析,运用脉冲微分包含(impulse differential inclusions, IDI)^[18]理论,对认知无人机的防撞运动特性进行分析,建立关于认知无人机-环境系统防撞稳定的概念,进而推导出系统防撞稳定的充要条件.

2 认知无人机与环境的一体化防撞建模

文献[19]提出了包含认知决策、制导规划和执行控制3个层级的无人机认知控制系统结构.其中,认知决策层是系统认知功能的核心,主要负责环境威胁的认知和防撞决策.制导规划层将认知决策输出解析为执行控制层的输入信号,以此实现无人机的防撞飞行控制.实际上,无人机认知防撞的过程是其与环境威胁实时动态交互的过程.认知决策层引导控制无人机规避威胁时不仅要考虑无人机本身的姿态、速度、高度等因素,还应预测和判断飞行环境中其他飞行器的相应信息,从而做出合适的防撞决策.因此,本文将具有认知决策功能的无人机与包含入侵机或其他碰撞威胁的飞行环境作为一个整体的认知无人机-环境系统进行分析,如图1所示.无人机认知决策层根据机载探测系统获取的威胁信息,结合当前反馈的本机飞行状态,生成相应的防撞规避策略.认知决策层输出的防撞策略可以是规避航路点序列,经制导规划层解算后生成飞控系统指令,也可以直接生成无人机行为指令(应急规避情形)^[20-21],控制无人机迅速执行相应的规避动作.

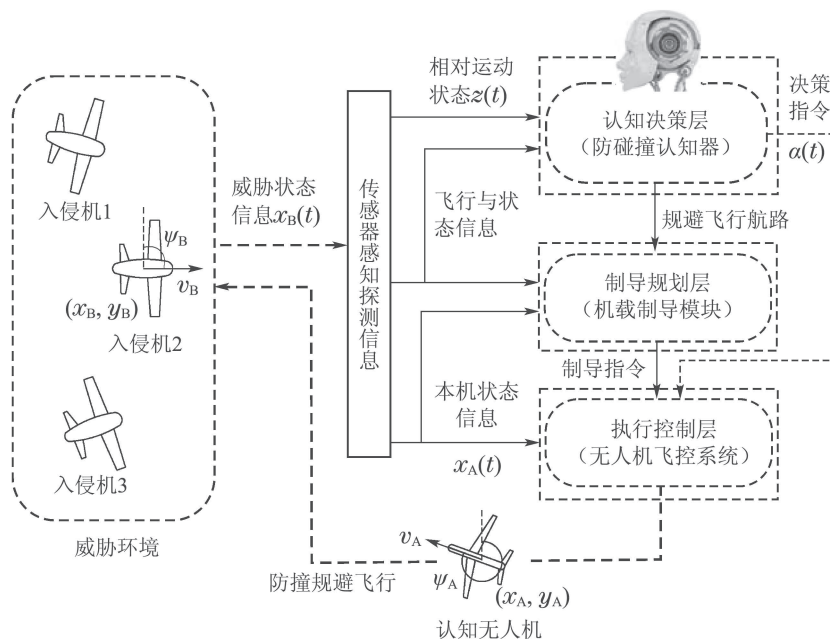


图1 一体化的认知无人机-环境系统

Fig. 1 Integral cognitive unmanned aerial vehicle & environment system

所以, 认知无人机-环境系统是一个包含了无人机、环境威胁以及认知防碰撞行为在内的复杂混合系统. 为具有一般性, 将认知无人机-环境系统中无人机与碰撞威胁的运动模型分别用式(1a)-(1b)所示的非线性微分方程进行描述:

$$\dot{x}_A(t) = f_A(x_A(t), u(t), t), \quad (1a)$$

$$\dot{x}_B(t) = f_B(x_B(t), v(t), t), \quad (1b)$$

式中: $x_A(t)$ 和 $x_B(t)$ 分别表示无人机和威胁的状态, $u(t)$ 为无人机的控制量, $v(t)$ 为威胁的控制输入.

借鉴飞行员通常采取常参量进行决策的认知行为^[22], 即只要入侵威胁的运动轨迹在期望轨迹可接受的安全范围之内, 就保持原来的控制量不变, 故可将无人机的认知防碰撞决策功能视为离散时刻一系列脉冲规避指令的发生过程:

$$\alpha(t) = \sum_{j=0}^N \alpha(\tau'_j) \int_{-\infty}^{t-\tau'_j} \delta(\tau) d\tau, \quad (1c)$$

式中: $\alpha(\tau'_j)$ 为 τ'_j 时刻的认知防碰撞决策指令信号, $\delta(\tau)$ 为单位脉冲函数. 上述式(1a)-(1c)共同构成了认知无人机-环境系统的一体化模型.

分析认知无人机-环境系统的防碰撞运动特性, 应考虑无人机与环境威胁之间的相对运动, 当有入侵机闯入无人机的飞行空域时, 机载传感器获取其运动状态信息 $x_B = (x_B, y_B, \psi_B, h_B, v_B)$, 其中: x_B, y_B 表示威胁的水平位置, ψ_B 为速度方向角, h_B, v_B 分别为高度和速度大小. 如果用相对距离 d_r 、相对速度方向角 θ_r 、相对速度大小 v_r 来表征威胁与无人机的相对运动状态, 则

$$\begin{cases} d_r = \|(x_B, y_B, h_B) - (x_A, y_A, h_A)\|_2, \\ \theta_r = \psi_B - \psi_A, \\ v_r = (v_A^2 + v_B^2 - 2v_A v_B \cos(\psi_B - \psi_A))^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (2)$$

上式微分得

$$\begin{cases} \dot{d}_r = v_r, \\ \dot{\theta}_r = \dot{\psi}_B - \dot{\psi}_A, \\ \dot{v}_r = \sum_{i=A,B} \left(\frac{\partial v_r}{\partial v_i} \dot{v}_i + \left(\frac{\partial v_r}{\partial \psi_i} \dot{\psi}_i \right) \right). \end{cases} \quad (3)$$

不失一般性, 设任意时刻($t \geq 0$)相对运动状态量 $z(t) \in \mathbb{R}^h$ 的变化规律可以通过下式描述:

$$\dot{z}(t) = \begin{cases} f_r(z(t), x_A(t), x_B(t), t), & t \geq \tau'_i, \\ \dot{x}_A(t), & 0 \leq t < \tau'_i, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_r(\cdot)$ 为表征 $z(t)$ 变化规律的抽象函数, τ'_i 为威胁闯入无人机飞行空域的时刻. τ'_i 之前, 认为威胁的运动状态对无人机没有影响, 故 $z(t)$ 转化为本机的飞行状态 x_A .

设 $S \subset \mathbb{R}^N$ 表征系统的整个状态空间, 因为本文将具有认知防碰撞能力的无人机与飞行环境视为一个

整体进行研究, 故定义认知无人机-环境系统状态 $s = (s_1 \cdots s_N)^T \in S$ 由描述碰撞威胁与无人机相对运动趋势的状态量 $z = (s_1, \dots, s_h)$ ($h < N$)和认知防碰撞决策变量 $\alpha = (s_{h+1}, \dots, s_N)$ 构成, 即

$$s = (z \ \alpha)^T. \quad (5)$$

通过分析认知无人机-环境系统运行过程中系统状态的运动可知, 系统工作过程中实际上包含了两种基本的工作模式. 在正常飞行状态下, 认知决策层不干预下层工作($\dot{\alpha} = 0$), 制导飞控系统控制无人机按预定航路飞行($z = x_A$), 因为该模式下系统状态运动连续, 称为连续工作模式; 若 τ'_i 时有碰撞威胁突然闯入无人机的飞行空域, 由式(4)可知, 此时二者的相对运动状态量 $z(t)$ 将发生脉冲阶跃变化($z(t) \neq z(\tau'_i)$, $t \rightarrow (\tau'_i)^-$), 这可以看作对系统的干扰脉冲. 为防止碰撞, 此后某个时刻 τ'_j ($j > i$), 认知决策层输出的规避指令 $\alpha(\tau'_j)$ 又使得决策变量 $\alpha(t)$ 发生跃变, 形成指令脉冲:

$$\dot{\alpha}(t) = \alpha(\tau'_j) \delta(t - \tau'_j), \quad \tau'_i < t < \tau'_{j+1}. \quad (6)$$

不论是 τ'_i 时刻突然闯入的威胁, 还是 τ'_j 时认知决策层输出的防碰撞决策指令, 都将引发系统状态的脉冲阶跃变化, 故称此时系统处于不连续的脉冲工作模式. 所以, 认知无人机-环境系统工作时, 无人机的防碰撞过程使得系统状态呈现出连续-脉冲运动的混合运动模式, 故可以将认知无人机-环境系统建模为一类脉冲微分包含系统. 为统一描述IDI系统状态的连续运动和脉冲运动, 定义混合时间集^[23]:

定义 1 混合时间集 $\tau = \{I_i\}_{i=0}^N$ 是一个有限(或无限)实轴上的时间区间序列, 满足

- 1) 对任意 $i < N$, $I_i = [\tau_i, \tau'_i]$;
- 2) 对 $N < \infty$, $I_N = [\tau_N, \tau'_N]$, 或 $I_N = [\tau_N, \tau'_N]$;
- 3) 对任意 $i \in N$, $\tau_i \leq \tau'_i = \tau_{i+1}$.

如果用两个集值映射 $F: S \mapsto \partial S$ (S 的幂集)和 $R: S \mapsto \partial S$ 分别表征系统状态 s 的连续变化和脉冲作用过程, 则可以建立认知无人机-环境系统的脉冲微分包含模型如下:

$$\begin{cases} \dot{s} \in F(s), & t \in [\tau_i, \tau'_i), \\ s(\tau_{i+1}) \in R(s(\tau'_i)), & t = \tau_{i+1}, \\ s = (z \ \alpha)^T \in S, & i = 0, 1, \dots, N. \end{cases} \quad (7)$$

记为 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$. 当系统处于连续工作模式时, 系统状态 s 的连续运动由微分包含 $\dot{s} \in F(s)$ 在 $t \in [\tau_i, \tau'_i)$ 上以 $s(\tau_i)$ 为起始的解 $s_i(\cdot)$ 描述; 当系统处于脉冲工作模式时, 用 $s(\tau_{i+1}) \in R(s(\tau'_i))$ 描述由于脉冲作用导致系统状态的阶跃变化.

3 基于IDI运行机理的防碰撞稳定性

若给定系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 初始条件 $s(\tau_0) = s_0$,

则系统在混合时间集 $\tau = \{I_i\}_{i=0}^N$ 上的一个运动轨迹 $s(\cdot)$, 可由微分包含 $\dot{s} \in F(s)$ 绝对连续解集 $S_F(\mathbb{R}^N)$ 中的一个序列 $\{s_i(\cdot)\}_{i=0}^N$ 来定义, 且满足: 对于任意 $0 \leq i < N$, $s_i(\tau'_i) \in \text{Dom}(R)$ ($\text{Dom}(R)$ 表征脉冲作用空间), 一定有 $s_{i+1}(\tau_{i+1}) \in R(s_i(\tau'_i))$, 并将系统从 s_0 出发的轨迹集合用 $\mathcal{R}_{S_{A-B}}(s_0)$ 来表示. $S_{A-B}(S, F, R)$ 系统状态 s 的一个运动轨迹如图2所示.

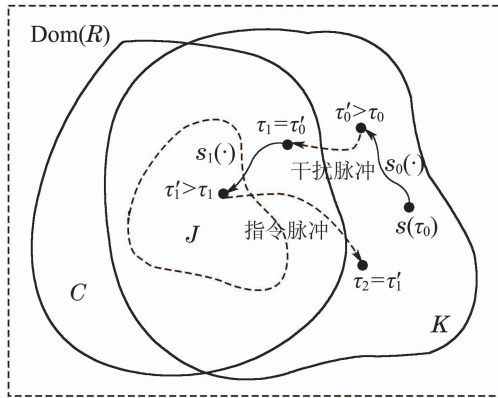


图2 认知无人机-环境系统状态运动轨迹示意图

Fig. 2 Running trajectory of cognitive unmanned aerial vehicle & environment system state

系统初始状态为 $s(\tau_0)$, 无人机沿预定航路正常飞行时, 认知决策层无需做出任何决策, 系统状态连续运动(图2中 $s_0(\cdot)$ 轨迹部分); 当 $t = \tau'_0$ 时, 有动态威胁突然闯入无人机的飞行空域, 系统状态 s 中用于描述威胁与无人机相对运动的状态量 $z(t)$ 当即跃变成干扰脉冲, 导致系统状态发生脉冲阶跃变化: $s(\tau'_0) \rightarrow s(\tau_1)$. 随着系统的继续运行, 碰撞威胁与无人机相对运动趋势和状态的变化(不断接近碰撞距离)将迫使认知决策层输出决策指令 $\alpha(\tau_1)$ 以规避威胁, 再次触发系统状态 τ_1 时刻的脉冲运动. 所以, 认知无人机-环境系统工作运行过程中, 突发威胁和无人机的认知决策行为使得系统状态呈现出混合运动模式.

就整个认知无人机-环境系统而言, 本文假设威胁的运动状态已知, 重点考虑无人机认知防碰撞决策的有效性. 文献[24]中建立了不可规避区模型, 对于不可规避区内的威胁状态, 受无人机本体物理约束和机动能力的限制, 即使无人机以最大侧向过载进行机动也无法避免碰撞. 所以, 在系统工作运行过程中, 若认知决策层不能在合适的时间内给出有效的防碰撞决策指令, 则必然导致碰撞事故的发生. 为深入分析认知无人机-环境系统的防碰撞运动特性, 定义下列集合:

1) 可控状态空间 $K: \forall s \in K \subset \mathbb{R}^N$, 无人机总可以通过认知决策避免碰撞.

2) 碰撞状态空间 C : 对系统状态 $s \in C \subset \mathbb{R}^N$, 若 $t < \inf\{\tau: s(\tau) \notin K, s(t) \in C\}$ 时, 始终没有认知决

策行为, 则必然发生碰撞.

3) 强迫决策状态空间 J : 对任意 $s(t) \in J \subset K$, 若 $\dot{\alpha}(t) = 0$, 则 $\forall \varepsilon > 0, s(t + \varepsilon) \notin K$.

通过上述定义可知, 可控状态空间 K 包含了不可规避区以外的所有威胁状态; 而强迫决策状态空间 J 则构成了 K 的边界. 图2中系统初态 $s(\tau_0) = s_0 \in K$, 由于干扰脉冲作用使得系统状态跃变为 $s(\tau_1) \in C$, 如果到达 J 之前认知决策层不给出任何规避指令, 则在 $t \in [\tau_1, \tau'_1]$ 时域内系统状态将连续运动(图2中 $s_1(\cdot)$ 轨迹部分). 当系统状态到达 J 时, 必须立即输出认知决策指令 $\alpha(\tau'_1)$, 控制无人机以满足动力学约束的最大过载进行规避机动, 才能脱离碰撞状态空间, 否则系统状态将进入不可控碰撞状态空间 K^c (K 的补集), 必然导致碰撞发生.

如果将突发的碰撞威胁和认知防碰撞决策行为视为认知无人机-环境系统中的脉冲作用, 当系统状态进入脉冲作用空间 $\text{Dom}(R)$ 时, 要得到连续的状态运动轨迹几乎是不可能的. 为深刻描述无人机认知防碰撞决策的有效性, 根据IDI系统的运行机理, 给出认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性定义如下:

定义2 如果对任意的系统初始状态 $s(\tau_0) = s_0 \in K$, 所有以 s_0 为起点的系统状态运动轨迹 $s(\cdot) \in \mathcal{R}_{S_{A-B}}(s_0)$, 满足对混合时间集 $\tau = \{I_i\}_{i=0}^N$ 上的任意时刻 $t \in \tau$, 均有 $s(t) \in K$ 成立, 则称系统 $S_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的.

实际上, 当无人机突然遭遇碰撞威胁时, 认知决策层引导控制其规避威胁的数学本质就是将认知无人机-环境系统状态从可控的碰撞状态空间 $K \cap C$ 转移到安全状态空间 $K \setminus C$ 的过程, 即使系统状态没有完全脱离碰撞状态空间 C , 也要设法使它一直保持在可控状态空间 K 中. 相反, 入侵威胁触发的干扰脉冲不仅阻止系统状态到达安全状态空间, 还试图将其驱逐出 K . 所以, 如果无人机的认知防碰撞决策行为能够使系统状态永远停留在 K 中, 就称系统 $S_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的, 反之, 则称系统防碰撞失稳.

4 系统防碰撞稳定的充要条件

根据IDI系统特性, 在合理的假设条件下, 可进一步导出认知无人机-环境系统防碰撞稳定的充要条件.

引理1 设 n 维向量空间中的马尔绍与李普西茨映射 $F: X \mapsto \vartheta X$, ϑX 表示 X 的幂集, K 与 J 是两个封闭集合且 $J \subset K \subset X$, 当且仅当对所有的 $x \in K \setminus J$, $F(x) \subseteq T_K(x)$ 成立, 则以 K 域内某点 $x_0 \in K$ 为起始的微分包含 $\dot{x} \in F(x)$ 的所有解满足以下两种情形之一^[18]:

i) 定义在区间 $[0, \infty)$ 上, 且 $\forall t \geq 0, x(t) \in K$;

ii) 定义在区间 $[0, T]$ 上, $x(T) \in J$, 且 $\forall 0 \leq t \leq T, x(t) \in K$.

上述引理中, $T_K(x)$ 表示闭集 K 在 x 处的Bouligand切锥:

$$T_K(x) = \{v \in X | \forall n \geq 0, x + h_n v_n \in K\},$$

式中: h_n 为大于零的实数且 $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n = 0$; $v_n \in X$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = v$. 显然, 如果 x 在闭集 K 的内部, 则有 $T_K(x) = X$.

为了保证所有初始条件在 $[0, +\infty)$ 上的系统状态运动轨迹都存在, 需做出如下假设: ① 集值映射 F 上半连续并且具有非空紧凸集值和线性递增的性质, 即 $\exists c \in \mathbb{R}^+, \forall x \in \mathbb{R}^n, \sup\{\|v\|: v \in F(x)\} \leq c(\|x\| + 1)$; ② $\exists \lambda \in \mathbb{R}^+, \forall x, x' \in \mathbb{R}^n, F(x) \subseteq F(x') + \lambda\|x - x'\|B(0, 1)$, 其中, $B(0, 1)$ 是 \mathbb{R}^n 中的闭单位球; ③ 集值映射 R 上半连续且 $\forall x \in \text{Dom}(R), R(x) \cap \text{Dom}(R) \neq \emptyset$. 则 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 系统防碰撞稳定的充要条件为

定理 1 系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的, 当且仅当系统的初始状态 $s_0 \in K$, 且对所有 $s(\tau'_i) \in \text{Dom}(R)$, 脉冲作用后的系统状态满足 $s(\tau_{i+1}) \in R(s(\tau'_i)) \subseteq K$.

证 必要性(反证法): 假设认知无人机-环境系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的, 如果

1) 系统初始状态 $s_0 \notin K$, 则显然不符合认知无人机-环境系统防碰撞稳定的定义(定义2), 与假设矛盾;

2) $\tau'_i (i = 0, 1, \dots, N)$ 时刻脉冲作用后的系统状态 $s(\tau_{i+1}) \in R(s(\tau'_i)) \not\subseteq K$, 则存在一个以 $s_0 \in K$ 为起点的系统状态运动轨迹 $s(\cdot) \in \mathcal{R}_{\mathcal{S}_{A-B}}(s_0)$, 经 τ'_i 时刻的脉冲作用后到达集合 K 以外的某个状态点 $s(\tau_{i+1}) \notin K$, 这与系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的假设矛盾.

综合1)2)可知, 定理1条件的必要性得证.

充分性: 设 $t = \tau_i$ 时 $s(\tau_i) \in K, i = 0, 1, \dots, N$. 当 $t \in [\tau_i, \tau'_i)$ 时, 系统状态连续运动, 从而一定有 $s(\tau_i) \in K \setminus J$ (如果 $s(\tau_i) \in J$, 则在强迫决策指令脉冲作用下, 系统状态将立即发生跃变, 不存在连续的状态运动轨迹). 由强迫决策状态空间的定义知, J 为可控状态空间 K 的边界, 故对任意的 $s \in K \setminus J$ 均处于可控状态约束集 K 的内部, 依据Bouligand切锥的性质知 $T_K(s) = S$, 故一定有 $F(s) \subseteq T_K(s)$ 成立. 根据引理1条件的充分性, 以 $s(\tau_i) \in K \setminus J$ 为起点的微分包含 $\dot{s} \in F(s)$ 的所有解 $s(\cdot)$ 满足以下两种情形之一:

i) 定义在时间区间 $[0, \infty]$ 上, 且对任意的 $t \geq 0, s(t) \in K$;

ii) 定义在时间区间 $[0, t']$ 上且 $s(t') \in J$, 对任意的 $t \in [0, t'], s(t) \in K$.

第i)种情形下 $\tau'_i \rightarrow \infty$, 故系统状态在 τ_i 之后的运动始终保持在 K 域内, 由定义2知系统防碰撞稳定; 第ii)种情形, 因为微分包含 $\dot{s} \in F(s)$ 在 $[\tau_i, \tau'_i)$ 上的解 $s_i(\cdot)$ 定义在区间 $[0, t']$ 上, 故 $\tau'_i \leq t'$, 即对所有的 $t \in [\tau_i, \tau'_i], s_i(t) \in K$ 且 $s_i(\tau'_i) \in J$. 当 $t = \tau'_i$ 时, 系统状态将被迫发生脉冲运动, 且脉冲作用后的系统状态 $s(\tau_{i+1})$ 满足 $s(\tau_{i+1}) \in R(s(\tau'_i)) \subseteq K$, 即 $t = \tau_{i+1}$ 时, 有 $s_{i+1}(\tau_{i+1}) \in K$ 成立, 又 $t = \tau_0$ 时, 显然有 $s(\tau_0) = s_0 \in K$, 由此递推可得系统在混合时间集 $\tau = \{I_i\}_{i=0}^N$ 上的混合运动满足 $\{s_i(\cdot)\}_{i=0}^N \subseteq K, s_{i+1}(\tau_{i+1}) \in R(s_i(\tau'_i)) \subseteq K$. 故对混合时间集 τ 上的任意时刻 $t \in \tau$, 均有 $s(t) \in K$ 成立, 所以系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 是防碰撞稳定的, 充分性得证. 证毕.

5 仿真与分析

仿真实验使用北京博创公司的iFLY-F1A自动驾驶仪作为模型无人机的控制装置, 控制指令为期望滚转角(ϕ_c)、飞行速度(v_c)和飞行高度(h_c). 为验证防碰撞稳定性定理(定理1)的有效性, 这里, 主要考虑突发紧急威胁的情况, 即要求无人机在较短时间内进行机动以避免碰撞, 因而认知决策层直接生成制导规避指令给飞控系统, 控制无人机迅速规避威胁. 无人机主要参数如表1所示.

表 1 无人机模型参数

质量	17 kg	机翼面积	1.354 m ²
翼展	3.2 m	平均气动弦长	0.423 m
巡航速度	27 m/s	配平迎角	2.35°
速度调节范围	22~36 m/s	滚转角调节范围	±20°

取碰撞威胁的状态观测量为 $x_B = (\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\psi} \ \hat{v})^T$, 与无人机的相对运动状态量 $z = (d_r, \theta_r, v_r)$. 为便于分析, 参照实际的飞行器空中管制与航路层管理规定^[25], 设定无人机的防碰撞行为只在固定高度层实施(h_c 为常数), 故认知决策变量即为滚转角和速度指令 $\alpha = (\phi_c, v_c)$, 则系统 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 的状态量为

$$s = (d_r \ \theta_r \ v_r \ \phi_c \ v_c)^T.$$

仿真场景设置如下: 无人机 A 在500 m高度以35 m/s的初速度向正北方向定常直线飞行, 初始状态 $x_A(0) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 500 \ 35)^T$. 碰撞威胁 B 自(0 2400 500)处以-25 m/s的速度正对无人机运动, 初始状态 $x_B(0) = (0 \ 2400 \ 180 \ 25)^T$. 给定无人机的有效前视探测距离为1500 m, 与碰撞威胁的最小安全距离为10 m. 根据以上条件, 结合无人机与威胁的相对运动模型, 可以确定出强迫决策状态集:

$$J_1 = \{s \in S | d_r = 210 \pm 1, \theta_r = 180 \pm 5, v_r = 60 \pm 1, \phi_c = 0, v_c = 35\}.$$

仿真初始时刻 $t_s = 0.0$, 终止时刻 $t_f = 80.0$ s. 当威胁位于无人机探测距离以外时, 威胁状态 x_B 取为 $\mathbf{0}$. 讨论两种情形下 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 系统的防碰撞稳定性.

首先考察系统防碰撞稳定时的情形. 当 $t_0 = 15$ s时, 正向动态碰撞威胁进入无人机的探测空间, 触发的干扰脉冲 $z(t_0)$ 使系统状态跃变为 $s_0 = (1474 \ 180 \ 60.57 \ 0 \ 35)^T$.

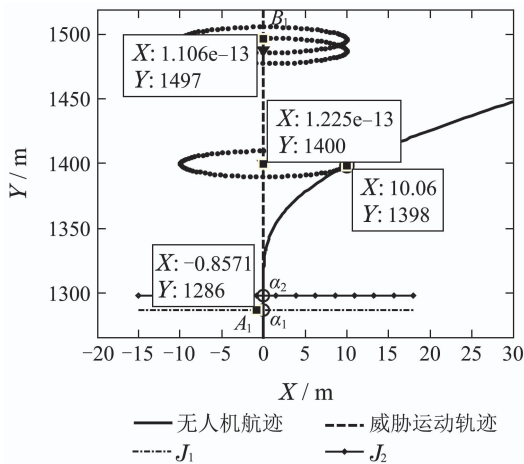
当 $t_1 = 36$ s时, 系统状态到达强迫决策空间 J_1 , 此时无人机与威胁分别位于 $A_1(0, 1286)$ 和 $B_1(0, 1496)$, 如图3(a)所示. 为避免碰撞, 认知决策层立即给出决策指令 $\alpha(t_1) = (0, 27)$, 在该指令脉冲 $\dot{\alpha}(t_1)$ 作用下, 系统状态再次发生跃变

$$s := \{s(t_1) \xrightarrow{\alpha} s(t'_1) | s(t'_1) \notin J_1\}.$$

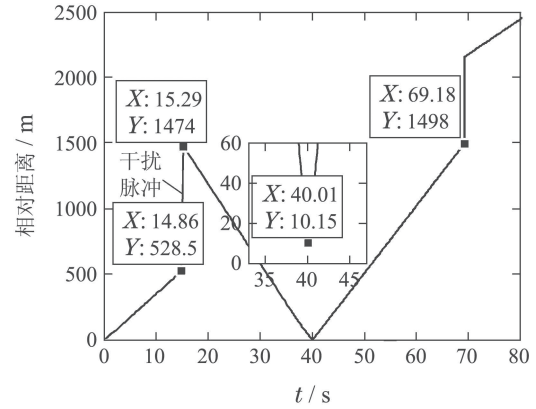
同时, 无人机在自驾仪内速度控制回路的作用下开始减速运动, 其速度大小变化如图3(d)所示. 在无人机速度逐渐下降的过程中, 最小转弯半径的不断减小使得强迫决策距离也相应缩短. 但是, 由于 t_1 时的决策行为并未改变威胁与无人机的相对速度方向角, 故仍然有 $s(t'_1) \in C$. 当 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 系统工作运行至 $t_2 \approx 36.5$ s时, 再次到达强迫决策状态集

$$J_2 = \{s \in S | d_r = 190 \pm 1, \theta_r = 180 \pm 5, v_r = 57.5 \pm 1, \phi_c = 0, v_c = 27\}.$$

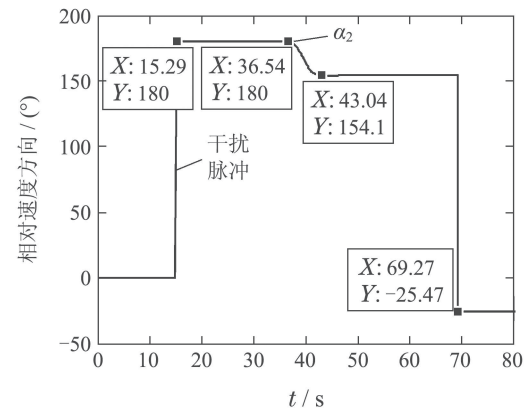
为引导控制无人机脱离碰撞状态空间 C , 认知决策层于此时输出决策指令 $\alpha(t_2) = (20, 27)$, 无人机随即向右滚转机动以规避威胁, 滚转角响应如图3(d)所示. $t \approx 40$ s时, 相对距离达到最小值(如图3(b)), 大于最小安全距离, 所以, t_2 时刻的决策指令脉冲能够使系统状态到达安全状态空间. 此后无人机恢复为正常飞行时的状态, 与威胁的相对速度方向不再变化, 如图3(c)所示. 根据以上分析可知, 该情形下 t_0, t_1, t_2 时刻脉冲作用后的系统状态均保持在可控状态空间 K 中, 满足定理1的条件, 仿真结果验证了此时 $\mathcal{S}_{A-B}(S, F, R)$ 系统是防碰撞稳定的.



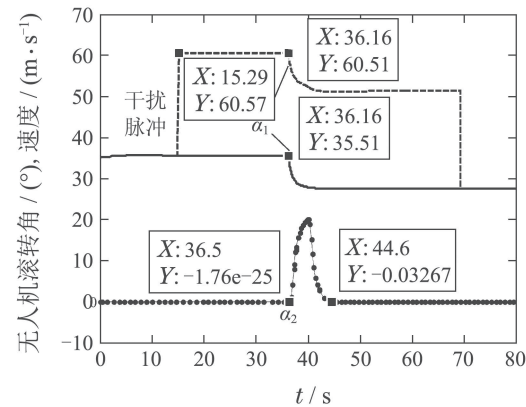
(a) 无人机与威胁的运动轨迹



(b) 相对距离变化过程



(c) 相对速度方向角变化过程



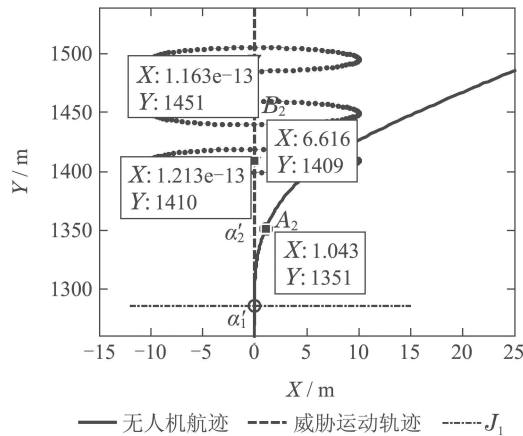
----相对速度 ———无人机速度 ·····滚转角响应

(d) 相对速度变化及无人机速度、滚转角响应

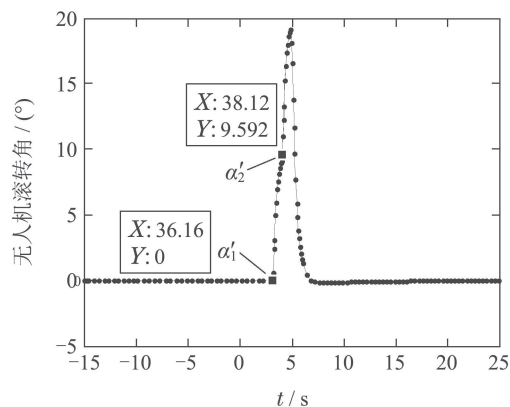
图3 认知无人机-环境系统防碰撞稳定时的仿真结果
Fig. 3 Simulation results in case of collision avoidance stability

其次考察系统防碰撞失稳时的情形. 如果系统状态到达强迫决策集 J_1 时, 认知决策层的输出指令为 $\alpha'(t_1) = (10, 35)$, 显然, 此时的滚转角指令 $\phi_c < |\phi_{max}|$, 故该指令脉冲作用后, 系统状态将进入不可控碰撞状态空间($s(t'_1) \notin K$), 不满足定理1的条件, 判定系统防碰撞失稳. 当系统继续运行至 $t_2 \approx 38$ s时, 无人机与威胁分别位于 $A_2(1.0, 1351)$, $B_2(0, 1451)$. 此

时, 认知决策层再次输出规避指令 $\alpha'(t_2) = (20, 35)$, 试图使无人机以最大滚转角规避威胁. 但由于系统状态 s 已经进入不可控碰撞状态空间, $\forall \alpha_2 \in \mathbb{R}^2, s(t_2) \stackrel{\alpha_2}{\rightarrow} s(t'_2) \notin K$, 必然发生碰撞事故. t_1, t_2 时刻指令脉冲作用下的无人机滚转角响应如图4(b)所示.



(a) 防碰撞失稳时无人机与威胁的运动轨迹



(b) 决策指令脉冲引发的无人机滚转角响应

图4 认知无人机-环境系统防碰撞失稳时的仿真结果

Fig. 4 Simulation results in case of losing collision avoidance stability

6 结论

为提高无人机应对复杂环境的防碰撞能力, 将认知防碰撞决策引入无人机控制系统, 基于混合时间集一体化考虑无人机与动态环境的交互过程, 建立了认知无人机-环境系统的脉冲微分包含模型. 运用IDI系统运行机理推导出了使系统防碰撞稳定的条件, 这对于无人机认知防碰撞控制系统的设计具有十分重要的理论意义. 今后将进一步研究系统防碰撞稳定条件下的认知决策生成机制, 提高无人机应对低空复杂动态环境的自主防碰撞能力.

参考文献:

[1] YU X, ZHANG Y. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects. *Progress in*

Aerospace Sciences, 2015, 74(2): 152 – 166.

- [2] AN G, LANGARI R. Collision cone based lane changing model for collision avoidance. *Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*. Virginia, USA: ASME, 2017.
- [3] JENIE Y I, KAMPEN E J, DE VISSER C C, et al. Selective velocity obstacle method for deconflicting maneuvers applied to unmanned aerial vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(6): 1140 – 1145.
- [4] JENIE Y I, KAMPEN E J, DE VISSER C C, et al. Three-dimensional velocity obstacle method for uncoordinated avoidance maneuvers of unmanned aerial vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, 39(10): 2312 – 2323.
- [5] ENRIGHT J J, FRAZZOLI E, PAVONE M, et al. *UAV Routing and Coordination in Stochastic, Dynamic Environments*. Netherlands: Springer, 2015.
- [6] CHEN Y B, LUO G C, MEI Y S, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory. *International Journal of Systems Science*, 2016, 47(6): 1407 – 1420.
- [7] SUN J, TANG J, LAO S. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm. *IEEE Access*, 2017, 5(11): 18382 – 18390.
- [8] GAI W, ZHANG N, LI Y, et al. A PD nonlinear dynamic inverse guidance law based collision avoidance for UAVs. *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. Piscataway: IEEE, 2017: 1417 – 1422.
- [9] CLARK M, PRAZENICA R J. Proportional Navigation Based Guidance Laws for UAV Obstacle Avoidance in Complex Urban Environments. *AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace*. Florida: AIAA, 2017.
- [10] LI Chengyu, YANG Tianming, GU Yong, et al. Neural basis of brain cognition. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(7): 755 – 764.
(李澄宇, 杨天明, 顾勇, 等. 脑认知的神经基础. 中国科学院院刊, 2016, 31(7): 755 – 764.)
- [11] LEWANDOWSKY S, OBERAUER K. Computational modeling in cognition and cognitive neuroscience. *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience, Methodology*, 2018, 5(1): 1 – 35.
- [12] ONKEN R, SCHULTE A. *System-ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [13] STENGER A, FERNANDO B, HENI M. Autonomous mission planning for uavs: a cognitive approach. *Proceedings des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress*. Berlin, Germany: DLRK, 2012.
- [14] RU Changjian, WEI Ruixuan, GUO Qing, et al. Guidance control of cognitive game for unmanned aerial vehicle autonomous collision avoidance. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1555 – 1560.
(茹常剑, 魏瑞轩, 郭庆, 等. 面向无人机自主防碰撞的认知博弈制导控制. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1555 – 1560.)
- [15] HE R K, WEI R X, ZHANG Q R. UAV autonomous collision avoidance approach. *Automatica*, 2017, 58(2): 195 – 204.
- [16] EMEL'YANOV S, MAKAROV D, PANOVA A I, et al. Multilayer cognitive architecture for UAV control. *Cognitive Systems Research*, 2016, 39(1): 58 – 72.
- [17] PANOVA A I. Behavior planning of intelligent agent with sign world model. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 2017, 19(1): 21 – 31.
- [18] AUBIN J, LYGEROS J, QUINCAMPOIX M, et al. Impulse differential inclusions: A viability approach to hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(1): 2 – 20.

- [19] WEI Ruixuan, XU Zhuofan, ZHANG Qirui, et al. New progresses in autonomous collision avoidance control for UAV. *Science & Technology Review*, 2017, 35(7): 64 – 68.
(魏瑞轩, 许卓凡, 张启瑞, 等. 无人机自主防碰撞控制技术新进展. 科技导报, 2017, 35(7): 64 – 68.)
- [20] WEI Ruixuan, HE Renke, ZHANG Qirui, et al. Skinner-based emergency collision avoidance mechanism for UAV. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(6): 620 – 624.
(魏瑞轩, 何仁珂, 张启瑞, 等. 基于Skinner理论的无人机应急威胁规避方法. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 620 – 624.)
- [21] LIU Xin, YANG Xiaopeng, LIU Yufan, et al. UAV path planning based on GA-OCPA learning system. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(11): 287 – 297.
(刘鑫, 杨霄鹏, 刘雨帆, 等. 基于GA-OCPA学习系统的无人机路径规划方法. 航空学报, 2017, 38(11): 287 – 297.)
- [22] CUI Junhui, WEI Ruixuan, ZHANG Xiaoqian. Dynamic decision-making method for safety region of sense and avoid system for unmanned aerial vehicle. *Control and Decision*, 2014, 29(12): 2195 – 2200.
(崔军辉, 魏瑞轩, 张小倩, 等. 无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法. 控制与决策, 2014, 29(12): 2195 – 2200.)
- [23] LYGEROS J, TOMLIN C, SASTRY S. Controllers for reachability specifications for hybrid systems. *Automatica*, 1998, 35(3): 349 – 370.
- [24] LIU Chang, WANG Honglun, YAO Peng, et al. Modeling and analysis of dynamic collision region for UAV avoiding aerial intruders. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(7): 1231 – 1238.
(刘畅, 王宏伦, 姚鹏, 等. 面向空中威胁的无人机动态碰撞区建模与分析. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1231 – 1238.)
- [25] COOK A. *European Air Traffic Management: Principles, Practice, and Research*. Farnham: Ashgate Publishing, 2007.

作者简介:

魏瑞轩 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无人机自主控制与应用, E-mail: rxwei369@sohu.com;

倪天 工学硕士, 目前研究方向为飞行器自主控制与智能化决策, E-mail: tianni0423@foxmail.com;

赵晓林 副教授, 主要研究方向为无人机自主导航, E-mail: zhaoxiaolin00@mails.tsinghua.edu.cn;

张兴宇 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体技术, E-mail: researcher_001@163.com.